

无线传感器网络可靠性技术分析

胡连亚 李 剑 周海鹰 左德承

(哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)

摘 要 由于无线传感器节点小体积、低功耗、有限资源等特色以及无线传感网络大规模、随机撒播、任务环境多变等特点,可靠性问题一直被视为制约无线传感器网络发展的重要因素。在分析其可靠性制约因素的基础上,调研提高无线传感器网络可靠性的研究方法,分别从节点以及网络两个方面介绍国内外主流的可靠性策略。调研无线传感器网络可靠性建模技术,提出可靠性建模技术的评价标准,从节点层次、网络层次分别概述其可靠性建模技术,并指出国内外对可靠性的研究所存在的问题以及无线传感器网络可靠性研究的发展前景。

关键词 WSN,无线传感器网络,可靠性研究,可靠性建模技术

中图法分类号 TP393.01 文献标识码 A

Reliability Research for Wireless Sensor Networks: A Survey

HU Lian-ya LI Jian ZHOU Hai-ying ZUO De-cheng

(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract Due to the characteristics of small volume, low power consumption, limited resources for the WSN node and the characteristics of large-scale, stochastic seeding, task environment variable for the WSN, reliability has been regarded as the fatal factors which restrict the development of the wireless sensor networks. With the analysis of the reliability constraints, this paper surveyed the wireless sensor networks reliability methods, respectively from node and networks aspects introduced main reliability methods in domestic and foreign. Through the study of the modeling methods of the WSN reliability from nodes level and networks level, this paper pointed out the standard of evaluating reliability modeling and gave the summary of reliability modeling technology. Finally, this paper pointed out some problems in reliability research from domestic and foreign and the development of WSN reliability research prospects.

Keywords WSN, Wireless sensor networks, Reliability research, Modeling methods of Reliability

无线传感器网络是由部署在特定监测区域的大量传感器节点通过无线通信形成的自组织网络。通过监测、采集特定区域内信息,经由自身的无线通信媒介传送给主节点(基站)并完成指定的信息处理。随着微机电系统(MEMS)、无线通信、数字电子等各项技术的发展以及实际应用需要,传感器节点逐渐向小型化、多功能化、低功耗化方向发展。特别是云计算、面向服务架构(SOA)、大数据等方向的兴起,给无线传感器网络的研究与应用带来了更加广阔的前景。

为使无线传感器网络更加准确、长时间地运行,在其部署之前需要对其进行可靠性分析,计算其正常工作情况的可靠度、失效概率及容错性能等,从而更好地规划传感器网络的部署。由于无线传感器自身包含有诸多特性,如资源有限、体积小、低功耗、事件驱动、随机撒播等,对其可靠性的研究与普通嵌入式设备或计算机网络的可靠性研究具有很大不同。本文将分 3 节介绍无线传感器网络可靠性技术,第 1 节主要介绍无线传感器网络的可靠性相关理论及国内外的研究现状;第 2 节主要介绍无线传感器网络可靠性建模技术,并且从传感

器节点的可靠性建模及网络可靠性建模两个层级进行详细说明,最后,指出传感器网络可靠性研究存在的问题和不足,并提出今后的可靠性研究发展方向。

1 无线传感器网络可靠性相关理论基础

图 1 为一个典型的无线传感器网络的系统结构图,包括随机撒播的传感器节点(群)、汇聚节点(基站)、互联网及用户(群)。传感器节点包括 3 个基本组成模块,即传感器模块、核心处理模块、无线通信模块。节点可以通过人工布置或者随机撒播等形式部署在监测区域,并通过自组织方式构成无线网络,以协作的方式采集信息并传递给汇聚节点(sink),进而传递给因特网远程控制中心或信息中心,经过远程中心信息处理转化为用户可用的信息并送达用户。

无线传感器网络的可靠性研究主要可以分为对节点可靠性的研究以及网络可靠性的研究。提高无线传感器网络的可靠性有两个途径:(1)提高节点可靠度,从而降低节点的失效概率;(2)提高网络整体的可靠度,在某个节点或者部分节点

本文受国家科技支撑计划(2011BAH04B03),科技部国际科技合作计划(2010DFA14400)资助。

胡连亚(1988—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络、移动计算,E-mail:hulianya@ftcl.hit.edu.cn;李 剑(1976—),女,博士生,主要研究方向为移动计算、无线传感器网络,E-mail:lijian@ftcl.hit.edu.cn(通信作者);周海鹰(1975—),男,博士,教授,主要研究方向为移动计算、服务计算等;左德承(1972—),男,博士,教授,主要研究方向为移动计算、容错计算等。

失效时,使网络能够保持正常工作,或保持关键任务的工作。

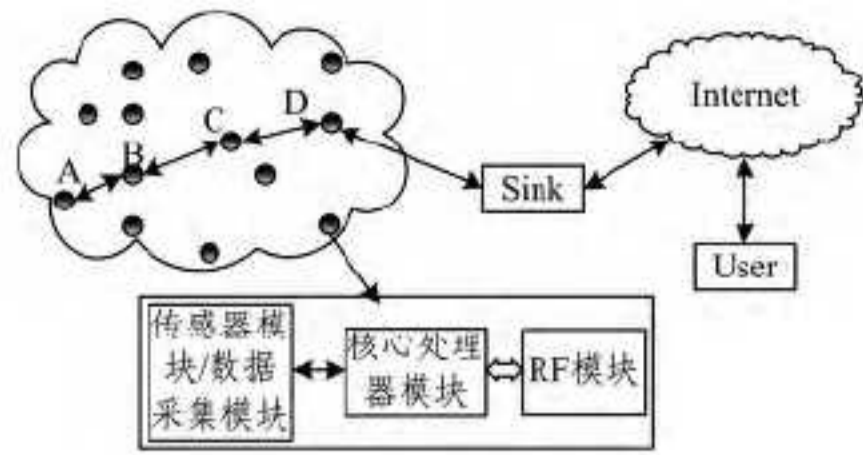


图1 典型无线传感器网络组织架构及节点结构图

国内外对于无线传感器网络的研究始于 21 世纪初。图 2 所示为以“WSN”和“reliability”为关键字搜索 SCI 数据库所得到的理论论文的发表情况,由图可以看出自 2003 年以来,国内外对该领域的研究一直处于持续增长状态,到 2008 年以后,处于较为稳定的状态,每年都会有 20 篇左右相关论文发表。图 3 表示上述所得到的文献按地区的排列情况,我国在此领域的研究以及所发表的文献较多,各国在传感器网络可靠性建模领域均有所研究,并取得了相应的研究成果。

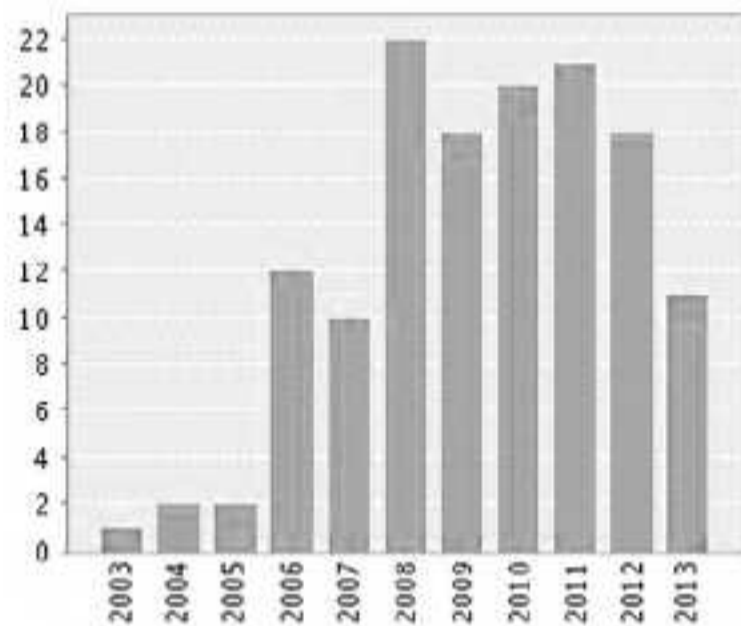


图2 近 10 年无线传感器网络可靠性研究文献发表情况^[1]

字段:国家/地区	记录数	占 137 的 %	柱状图
PEOPLES R CHINA	37	27.007 %	■
USA	36	26.277 %	■
CANADA	12	8.759 %	■
ITALY	9	6.569 %	■
SOUTH KOREA	5	4.380 %	■
AUSTRALIA	5	3.650 %	■
FRANCE	5	3.650 %	■
SPAIN	5	3.650 %	■
GERMANY	4	2.920 %	■
PORTUGAL	3	2.190 %	■

图3 近 10 年各国在感知网可靠性领域所发表的文献^[1]

1.1 无线传感器网络节点可靠性研究

近年来,有关嵌入式设备的可靠性研究已经渐趋成熟,无线传感器网络节点作为嵌入式设备的一种,不失嵌入式设备的一般性,同时也具有自身的特点。针对无线传感器网络节点进行可靠性建模时应考虑其如下特性:(1)有限的资源;(2)低功耗;(3)通常为事件驱动,组件间联系紧密。

目前,国内外对传感器节点的可靠性研究主要分为硬件可靠性研究以及软件可靠性研究,由于软件故障率较高,因此感知节点可靠性研究中又以软件可靠性研究居多。以下为现在主流的两两种可靠性建模研究方法:

(1)通过提高容错能力,利用冗余等方法,提高系统的可靠性,并运用 AADL 或 UML 建立系统的架构模型,从而根据事件驱动分析其数据采集、预处理等的可靠性。文献^[2]分别

从软件及硬件两个角度研究提高嵌入式设备可靠性的方法,主要思想为软件系统的冗余、硬件驱动的冗余容错,以及设备驱动程序运行空间与内核运行空间隔离的方法来实现设备的可靠性。此类可靠性策略的优点是直观、有效,缺点是资源需求比较大,成本较高,特别是对于无线传感器网络这种资源限制类,制约更加明显。

(2)通过分析系统及其各个模块的状态以及状态之间的相互影响关系来建模分析可靠性,根据分析的结果优化架构设计以及任务调度处理,从而提高系统的可靠性。文献^[3,4]分别从软件以及硬件两个方面构建基于状态转移的 Markov 链过程可靠性模型,并分别对模型的可靠性提出定量分析方法。文献^[5,6]介绍一种基于 AADL 的可靠性建模方法,运用 AADL 的错误模型中状态转移的思想,利用 AADL 构建嵌入式设备的状态转移模型,并将 AADL 中的状态转移模型向 GSPN(Generalized Stochastic Petri Nets, 广义随机 Petri 网)库所变迁模型转化,并运用已成熟的 GSPN 模型思想定量计算其可靠性。

1.2 无线传感器网络层可靠性研究

无线传感器网络由大量的密集部署在特定区域的传感器节点组成,节点间通过无线信道连接,采用多跳、对等通信等方式自组织生成网络拓扑结构,传感器节点间具备较强的协同处理能力,并能通过局部的数据采集、数据预处理、数据发送等来完成全局任务。

随着物联网、云计算、面向服务架构(SOA)等技术的发展,无线传感器网络应用可采用以服务的形式面向普通大众,从而拓宽无线传感器网络的应用范围并使之规模不断变大,无线传感器网络的可靠性问题也因而变得日益突出。针对其进行可靠性研究必须围绕其特性开展,提高无线传感器网络可靠性的方法主要有以下几种:

(1)优化网络拓扑结构,文献^[7]通过对传统无线传感器网络协议 LEACH 的改进,提出一种新的传感外网络拓扑算法 ERCTNA(energy-efficient and reliable cluster algorithm for topology)。ERCTNA 算法通过簇头辅助节点的设置和优化传输信息模式以平衡簇头的能量负载,增加网络的拓扑可靠性,改善传统的无线传感器网络中远距离通信所带来的能耗过度损耗的问题,有效延长整个网络的生命周期,从而提高无线传感器网络的可靠性。

(2)提高数据传输的可靠度,信息传输的不可靠通常由以下几种原因引起:a)在无线信道中,由于信息碰撞、信息丢失等原因引起的无线信道传输差错;b)信息堵塞;c)由于信息的远距离传播导致承载信息的能量损耗,使其达不到接收方要求的电平阈值;d)环境因素。前两种原因可以通过传统的 TCP/IP 协议中的差错恢复、拥塞控制和流量控制等方法解决,第三及第四点原因由于传感器网络低功耗的特性要求而尤为突出。

(3)冗余策略,文献^[8]提出一种均一部署的无线传感器网络生存时间受到单跳到基站或 sink 节点的传感器节点的限制,文中称之为“能量洞”问题。通过设置冗余辅助节点通常可以解决此类问题,例如文献^[9,10]采用添加静态传感器节点的方法,文献^[11]使用添加移动传感器节点的方法,文献

[12]使用添加移动的 Sink 节点的方法。

2 无线传感器网络可靠性建模技术

2.1 评价可靠性建模技术的标准

本文以目前已经广泛应用于欧美航空工业界的建模语言 AADL 为例介绍评价可靠性建模技术的几个标准:

(1) 模型仿真的复杂程度: 对于任意传感器网络节点, 对其进行可靠性建模的复杂程度及工作量。是否支持图形化工作方式, 是否具有可配置建模环境, 是否具有结构化、模块化等特点。以 AADL 语言为例, AADL 支持图形化界面开发, 其开发环境 OSATE(Open Source AADL Tool Environment) 支持图形、代码以及 XML 列表 3 种等价语言的转化, 如图 4 所示。此外, AADL 是一种软硬件架构设计建模语言, 对系统的建模是面向对象的、模块化的、可重构的。

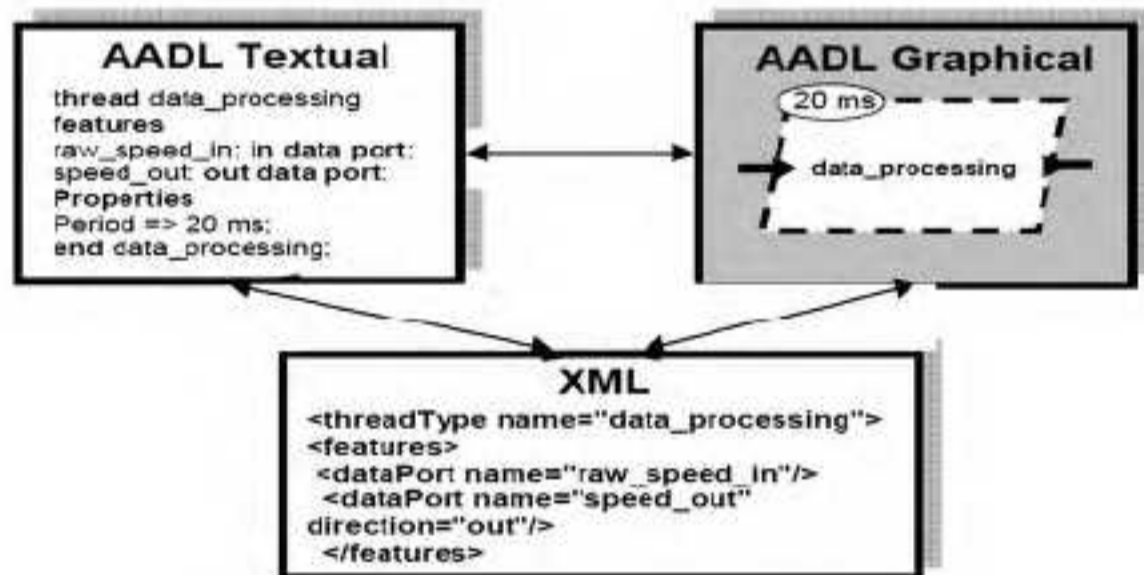


图 4 AADL 表现形式

(2) 仿真功能: 可靠性模型所具有的功能, 可靠性仿真结果与实际系统的契合度, 模型是否具有故障修复能力或容错能力, 是否具有空闲管理功能, 是否具有不同的失效模型以及是否具有其他相关的仿真功能。图 5 为 AADL 语言建模所分析的领域, 其中, 可靠性为 AADL 建模主要分析领域之一。此外, AADL 还能够对系统的能耗、安全性以及数据质量进行建模仿真分析, 从而更加准确地分析系统的可靠性。

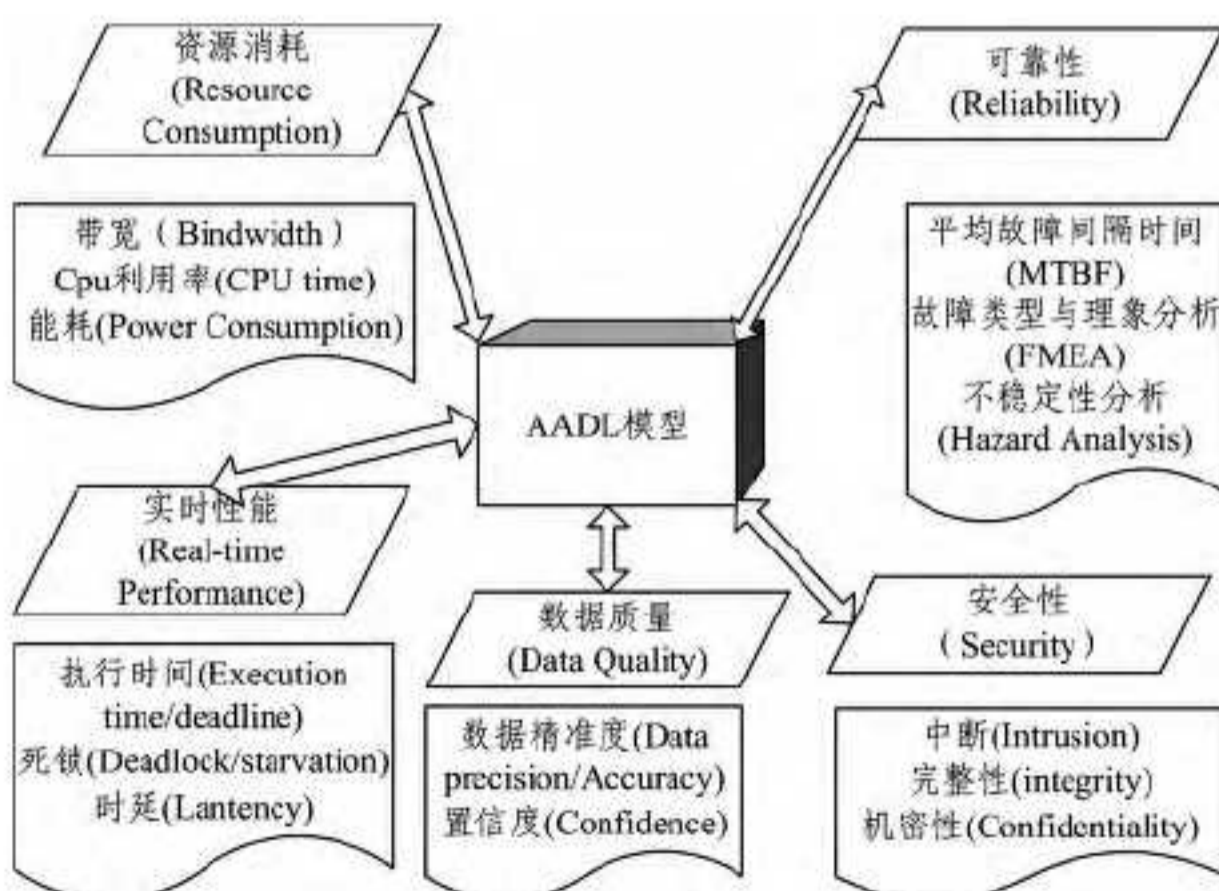


图 5 AADL 模型的研究领域和模型中的定量分析变量名

(3) 规范化的语义描述: 支撑模型的语言是否完整, 是否是非二义的, 语言是否是可扩展、可重塑的。

(4) 模型的可扩展性: 鉴于无线传感器网络节点鲜明的模块化特色, 评价传感器网络节点的可靠性模型的重要一点是该模型是否是可扩展、可重构的, 模型是否具有根据不同的任务环境、任务特色自动变迁的能力。由于 AADL 建模思想是

面向对象的、模块化的思想, 因此 AADL 模型都是可重用的, 并极大地方便系统的扩展, AADL 模块化可重构的思想也极大地方便同一系统应用于不同场景的情况, 只需要对模块的配置参数重新定义即可。

(5) 是否符合无线传感器网络的应用特性。由于本文讨论的主题是对无线传感器网络的可靠性进行研究, 因此仿真建模工具应符合无线传感器网络的特性需求。AADL 语言支持对系统的资源消耗分析, 并且支持事件驱动模型仿真分析方式, 基本符合无线传感器网络的应用需求。

2.2 无线传感器网络节点可靠性建模技术

传感器的节点具有小体积、低功耗以及面向多种复杂环境的特点, 因此, 影响无线传感器网络可靠性的最大因素为节点失效。传感器节点的可靠性是指其在一定条件和时间下完成任务的概率。由于传感器节点为特殊的嵌入式设备, 对嵌入式设备的可靠性建模技术的研究也同样适用于无线传感器网络节点的可靠性建模研究。国内外对于嵌入式通信设备的可靠性研究工作已经非常深入和广泛。这些建模方法主要分为 3 类: (1) 通用模型: 不仅可以进行可靠性相关属性的建模分析, 还可以对能耗、安全性等其它相关属性进行分析。例如 CTMCs(Continuous-Time Markov Chains)^[13,14]、SPNs(Stochastic Petri Nets)^[15] 以及它们的扩展语言 GSPNs^[16]、SPAs(Stochastic Process Algebras)^[17]、IMCs(Interactive Markov Chains)^[18]、I/O IMCs(Input/Output Interactive Markov Chains)^[19]。(2) 可靠性专用模型: 针对可靠性分析的特点研究, 仅适用于对系统的可靠性进行分析。如 RBDs(Reliability Block Diagrams)^[20]、dynamic RBDs^[21]、dFTs(dynamic Fault Trees)^[22]、eFTs(extended Fault Trees) 等。(3) 结构化层级模型: 一些基于结构化语言的模型如 AADL(Architecture Analysis and Design Language)^[23] 语言, 结构化 UML 语言, 以及基于此类语言研究的应用于可靠性模型建模分析的扩展包 error annex^[24] 和扩展工具 COMPASS^[25] 等。

2.2.1 通用模型

本文以 SPNs(Stochastic Petri Nets) 为例说明通用模型的可靠性建模思想, 表 1 列出 SPNs 的主要图形化元素及其基本含义。

表 1 SPN 建模元素的图形化表示

元素	符号	基本含义
库所	○	系统的状态、资源或条件
瞬时变迁	■	改变系统状态的事件, 延时为零
赋时变迁	□	改变系统状态的事件, 延时服从指数分布
令牌	●	库所中拥有的资源的数量
有向弧	→	系统状态与事件之间双向的因果关系
禁止弧	○	与禁止弧相连的库所中令牌数量满足变迁激发条件时, 禁止该变迁的激发

文献[16]详细介绍运用 SPNs 进行可靠性建模的方法, 并列举 7 个 SPNs 可靠性建模应用场景。本文以第一个简单场景为例简要介绍其方法及思想, 假设一个两个单元相连的简单系统, 两个单元的失效概率和修复概率分别为 λ, μ , 用 Markov 链构建的模型如图 6(a) 所示, 仅需要两个状态: 0, 两个单元均正常工作; 1, 一个单元正常工作, 另外一个处于空闲, 因此从 0 到 1 的概率为 2λ , 从 1 到 0 的概率为 μ 。图 6(b) 表示该模型的 SPNs 建模表述, 有 3 个库所(place): up, down

及 standby 以及 2 个令牌(token), 令牌的某一状态的出现表示两个单元在相应的状态上, 初始时令牌均在 up 状态内, 表示两个单元均正常工作, 当某一单元发生故障, 则令牌通过故障变迁至 down 状态, 故障概率以及故障修复概率可以通过变迁(transition)设置。SPNs 进行此类可靠性分析的优势在于其可以分析多状态、多单元下不同故障概率的变迁, 并可以很容易计算不同状态所出现的概率, 即可靠度。

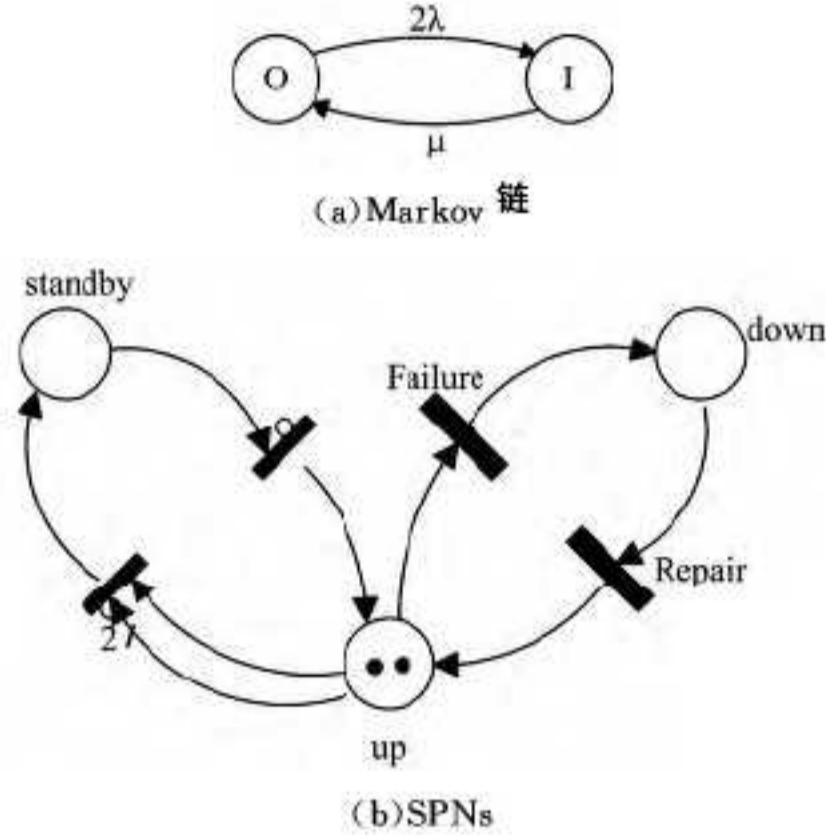


图 6 两单元相连系统的可靠性建模

2.2.2 可靠性建模专用模型

本文以 RBDs(Reliability Block Diagrams) 为例介绍可靠性建模专用模型的思想及方法, RBDs 是一种系统可靠性的图表表示方法, 系统单元间根据可靠性关系连接, RBDs 优点是易读, 在 RBDs 中一个逻辑图表表示引起系统故障的组单元, 或是使系统保持正常工作的单元, 因此 RBDs 是基于系统设计的, 一个块(block)表示系统单元正常工作, 块的移除表示单元故障并失效, 如果块失效达到一定的数量, 则表示系统失效。图 7 为串联系统及并联系统的 RBDs。

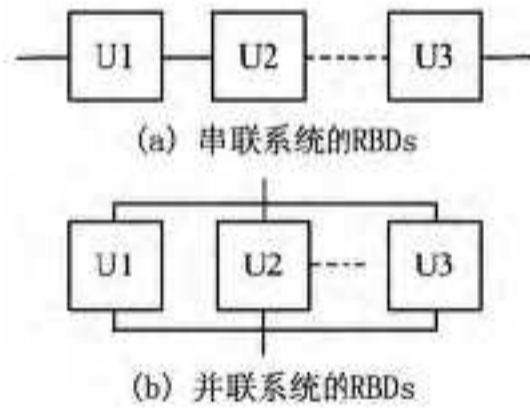


图 7

RBDs 已经被广泛地运用于系统的可靠性模型构建, 但是这种结构化建模方法仅仅适应于确定的已配置系统, RBDs 不能够对动态系统或复杂可修复系统进行建模。文献[21]针对 RBDs 的局限性提出一种动态 RBDs 方法, 在此不详细陈述。

2.2.3 结构化层级模型

结构化层级模型主要在系统结构化建模的基础上对系统的各项功能及非功能属性进行建模仿真分析, 可以非常直观地体现系统的架构设计思想, 比如可靠性策略、能耗策略、调度策略等。

本文以近年来兴起的 AADL 语言为例介绍结构化层级模型, AADL(Architecture Analysis and Design Language) 是由美国汽车工程师学会(the Society of Automotive Engineers)开发用于结构化的定量分析研究实时嵌入式操作系统的一种建模语言。AADL 语言支持对系统的可靠性、安全性、实时性、资源消耗以及数据质量 5 方面进行定量的建模分析。

本文主要介绍 AADL 对可靠性分析的思想与方法, AADL 错误模型为 AADL 支持可靠性建模的扩展包。图 8 所示为一个简单的错误模型的表述方法, 其可靠性建模的核心思想类似于随机 Petri 网的可靠性建模思想, 通过定义错误事件(error event)的发生, 引发组件状态(state)转移的变迁(in out error propagation), 根据设置影响系统正常工作的错误事件序列、故障率(occurrence)来仿真系统的运行, 并定量计算出某一状态的概率, 以及系统的可靠度或失效概率。

```

error model Basic
features
  Error_Free: initial error state;
  Stopped, Babbling: error state;
  Fail_Stop, Fai_Babbling : error event;
  No_Data, Bad_Data : in out error propagation;
end Basic;

error model implementation Basic.Nominal
transitions
  Error_Free -[Fail_Stop, in No_Data]-> Stopped;
  Error_Free -[Fail_Babbling, in Bad_Data]-> Babbling;
  Stopped -[ outNo_Data ]-> Stopped;
  Babbling -[ out Bad_Data ]-> Babbling;
properties
  Occurrence => poisson 10E-4 applies to Fail_Stop;
  Occurrence => poisson 10E-6 applies to Fail_Babbling;
end Basic.Nominal;

```

图 8 AADL 错误模型表述

2.3 无线传感器网络可靠性建模技术

虽然国内外对于无线传感器网络可靠性建模的研究已经广泛开展, 但是仍然没有关于其可靠性模型的明确定义或分类。本文通过文献[26-36]对无线传感器网络可靠性建模的研究方法的学习, 将无线传感器网络可靠性建模分成两类。

2.3.1 基于失效的无线传感器网络可靠性模型

无线传感器网络为具有一定拓扑结构并被部署在不同环境下的分布式网络, 传感器节点具有体积小、低功耗等特点, 因此无线传感器网络的存活时间一般都要受到传感器节点能量消耗以及环境的影响, 即平均网络寿命。从网络整体来说, 即意味着部分节点会随机失效。文献[27-34]将传感器网络中的可靠性归类为各组成元件的可靠性层次, 通过处理各个层次组件的可靠性来实现系统的可靠性。文献[28]对无线传感器网络的寿命影响因素进行分类总结, 认为无线传感器网络的寿命取决于传感器节点的寿命。传感器节点寿命的终结有主观原因, 也有客观原因, 主观原因有电池电量耗尽、电量低于阈值, 客观原因有环境因素影响、软件硬件故障等。所以, 基于无线传感器网络的平均寿命可靠性模型即基于传感器节点失效的可靠性模型[29]。

基于失效组件建立模型的方法主要有(1)建立节点的串联、并联和串并联组合的树形结构的可靠性模型[30]; (2)考虑节点间连接失效, 根据 Zigbee、LEACH 协议的各种拓扑结构建立基于节点失效的可靠性模型[30,31]; (3)根据传感器节点状态的转化建立的基于节点失效的 Markov 链模型[32-34]。

2.3.2 基于任务的无线传感器网络可靠性模型

基于任务的无线传感器网络可靠性建模的主要思想是根据定义传感器网络的事件或任务计算任务或事件被完成或被传递到汇聚节点的概率, 即通过计算任务完成概率来评测可靠度。

基于任务完成概率建立的模型主要方法有: (1)定义事件 A, 建模计算至少有一个传感器节点能够成功采集信息并将数据通过 sink 节点传送至服务器的概率, 即可靠度, 通过事

件驱动的方法建立可靠性模型^[35]; (2) 通过对传感器网络的拓扑结构或簇结构建立可靠性模型, 定义无线传感器网络的可靠性为至少被 k 个以上传感器节点覆盖并且都联通到 sink 节点的概率^[36,31]。

结束语 本文主要从无线传感器网络可靠性理论以及可靠性建模技术两个方面介绍无线传感器网络的可靠性研究情况, 并分别给出目前国内外可靠性研究的相关技术, 包括提高可靠性的策略、可靠性建模技术等。无线传感器网络的可靠性研究旨在针对无线传感器网络小体积、随机撒播、低功耗以及环境影响因素复杂等特点对其可靠性进行研究分析, 目的是预测其平均寿命或延长其网络整体平均寿命。随着物联网技术、云计算技术、SOA 技术的发展, 无线传感器网络已将应用领域扩展到医疗、农业、天气预测、智能交通、智能家庭甚至个人穿戴设备中, 其应用的多样性要求其具有不同环境下的高可靠性。目前对于传感器网络的可靠性研究已经非常广泛, 并在传感器节点层级以及无线网络层级均取得显著的研究成果, 同时提出了多种可靠性策略以及可靠性建模技术。

待解决的问题

目前主流的提高无线传感器网络可靠性的策略以及建模技术多从节点和网络两个层次分别进行研究, 节点的可靠性研究也大多从软件层级和硬件层级分开研究, 但是无线传感器网络为一个整体, 如何从网络整体的角度, 软硬件相结合、节点与网络相结合的角度研究无线传感器网络可靠性, 是一个值得探索的领域。

提高无线传感器网络的可靠性策略有很多, 但是均有很大的限制, 其中, 软硬件模块的冗余、节点冗余以及部分网络的冗余是一种相对直观、有效、易于实现的方法。但是由于无线传感器网络本身的特点, 不能存在过多的冗余, 如何达到传感器网络性能、可靠以及成本的最优化将是今后研究的重点。

环境因素是制约无线传感器网络可靠性的重要因素, 目前国内外在这方面的研究还比较少, 无线传感器网络可靠性建模研究中也仅仅将环境因素作为一个因子进行简单的可靠性计算, 因此如何从环境因素影响方面提高无线传感器网络的可靠性也是一个值得研究的领域。

由于无线传感器网络节点资源受限以及无线通信的特点, 能耗问题是制约传感器网络节点寿命的最大影响因素, 对传感器节点能耗优化的研究也是提高无线传感器网络节点可靠性的重要研究领域。

无线传感器网络可靠性研究的发展

近年来, 物联网、云计算、SOA 等技术已经逐渐成为计算机领域的研究热门领域, 同时, 智慧地球、智慧家居、智能交通理念的提出, 也使得无线传感器网络的应用范围不断扩大, 无线传感器网络的组织形式不断变化。

随着电池技术、无线充电技术的发展, 制约无线传感器网络可靠性的能耗问题会逐渐被解决。同时, 随着移动嵌入式设备软硬件技术的迅速发展, 其能耗、性能等各方面均不断得到优化, 从而大大增加了无线传感器网络的可靠性。此外, 无线通信技术的发展, 无线网络协议的发展等也不断促进无线通信质量的提高, 保证无线通信安全性和可靠性。

近年来国内外建模技术也在不断发展, AADL 语言、结构化 UML 语言的提出与发展为传统的可靠性建模开辟了新的领域。从软硬件架构结合、模块化、面向对象的角度对系统

进行建模, 使得无线传感器网络的建模技术得到很大的发展, 其设计与建模分析、开发结合的“模型驱动工程”思想可以缩短系统的研发周期, 促进无线传感器网络的研究。

参考文献

- [1] <http://apps.webofknowledge.com/>. 2014. 02
- [2] 王源源. 嵌入式底层软硬件可靠性保障技术研究及应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2012
- [3] 卜国峰, 朱小冬, 吴彩华, 等. 基于 Markov 链使用模型的软件可靠性测试用例生成研究[J]. 科技广场, 2009(9): 6-9
- [4] 郭荣佐, 黄军, 王霖. 基于 Markov 链的嵌入式系统硬件可靠性研究[J]. 计算机应用, 2012, 32(4): 1152-1156, 1164
- [5] Rugina A E, Kanoun K, Kaaniche M. A system dependability modeling framework using AADL and GSPNs[M] // Architecting Dependable Systems IV. Berlin Heidelberg: Springer, 2007: 14-38
- [6] 高磊, 董云卫, 张凡, 等. 一种 AADL 系统可靠性模型转换方法[J]. 计算机工程, 2011, 37(14): 21-26
- [7] 季兵兵, 姚艳艳, 栾亚丽. 无线传感器网络节点可靠性分析[J]. 传感器世界, 2009, 15(12): 36-40
- [8] Katsuma R, Murata Y, Shibata N, et al. Maximizing Lifetime of Wireless Sensor Networks with Mobile Sensor Nodes[C] // Ninth International Conference on Mobile Data Management Workshops, 2008(MDMW 2008). IEEE, 2008: 141-150
- [9] Srinivasan W W V, Chua K C. Trade-offs between mobility and density for coverage in wireless sensor networks[C] // Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Mobile computing and networking. ACM, 2007: 39-50
- [10] Cinque M, Cotroneo D, Di Martinio C, et al. Modeling and assessing the dependability of wireless sensor networks[C] // 26th IEEE International Symposium on Reliable Distributed Systems, 2007(SRDS 2007). IEEE, 2007: 33-44
- [11] Katsuma R, Murata Y, Shibata N, et al. Maximizing Lifetime of Wireless Sensor Networks with Mobile Sensor Nodes[C] // Ninth International Conference on Mobile Data Management Workshops, 2008(MDMW 2008). IEEE, 2008: 141-150
- [12] Yun Y S, Xia Y. Maximizing the lifetime of wireless sensor networks with mobile sink in delay-tolerant applications[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(9): 1308-1318
- [13] Carrasco J A. Computationally efficient and numerically stable reliability bounds for repairable fault-tolerant systems[J]. IEEE Transactions on Computers, 2002, 51(3): 254-268
- [14] Baier C, Haverkort B, Hermanns H, et al. Model-checking algorithms for continuous-time Markov chains[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2003, 29(6): 524-541
- [15] Volovoi V. Modeling of system reliability Petri nets with aging tokens[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2004, 84(2): 149-161
- [16] Malhotra M, Trivedi K S. Dependability modeling using Petri-nets[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1995, 44(3): 428-440
- [17] Hillston J. A compositional approach to performance modelling[M]. Cambridge University Press, 2005
- [18] Hermanns H. Interactive Markov chains: and the quest for quantified quality[M]. Springer-Verlag, 2002

(下转第 285 页)

要保证所有地雷节点的监测范围可以完全覆盖整个目标区域。雷场不可避免地可能遭到毁伤性破坏,要想保证雷场的良好性能,就要及时检测余下的地雷是否还能完全覆盖目标区域,也就是要检测雷场中是否出现未覆盖到的通道,这样才能及时修复雷场。本文首先定义了基于无线传感器网络的雷场网络模型,并针对雷场特性提出了雷场通道的概念,给出了雷场中可能形成的内部通道和边缘通道的形式化定义,得出了雷场中存在通道是机动车辆可以通过的必要条件这一重要定理,并给出证明。针对内部通道和边缘通道,分别提出了相应的检测算法。

下一步的工作将在实际雷场环境中检验通道检测算法的性能和精确性,同时还要继续研究雷场通道的定位和快速修复方法,以实现智能化网络雷场持续迟滞敌人的首要目标。

参 考 文 献

- [1] 邓光明,张海良,焦国太,等. 基于超声波的雷场节点分区域识别定位方法[J]. 探测与控制学报,2010,32(3):65-69
- [2] 蒋丹. 无线传感器网络覆盖盲区的发现与修复方法研究[D]. 沈阳:东北大学,2008
- [3] 唐峰,罗汉文,许业文. 移动 Ad Hoc 网络在美军自愈雷场中的应用[J]. 工兵装备研究,2005,24(5):61-64
- [4] Rolader G, Rogers J, Batteh J. Self-healing minefield[C]// Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. Bellingham, USA, 2004:13-24
- [5] Huang C-F, Tseng Y-C. A survey of solutions to the coverage problems in wireless sensor networks[J]. Journal of Internet Technology, 2005, 6(1):1-8
- [6] 刘姣姣. 无线传感器网络中基于 Voronoi 图的网络覆盖技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2011
- [7] Zhang C, Zhang Y, Fang Y. Localized algorithms for coverage boundary detection in wireless sensor networks[J]. Wireless networks, 2009, 15(1):3-20
- [8] Bejerano Y. Simple and efficient k-coverage verification without location information[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM). Phoenix, USA, 2008:291-295
- [9] Ghrist R, Muhammad A. Coverage and hole detection in sensor networks via homology[C]// Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks. Los Angeles, USA, 2005:34
- [10] de Silva V, Ghrist R. Coverage in sensor networks via persistent homology[J]. Algebraic & Geometric Topology, 2007, 24(7):339-358
- [11] 高昆,赵晓辉. 智能雷场的无线传感器网络技术研究[J]. 无线电工程,2008,38(4):15-17
- [12] 杨凯,刘全,张书奎,等. 利用移动内点来修复传感器网络空洞的算法[J]. 通信学报,2012,33(9):116-124
- [13] Zhang C, Zhang Y, Fang Y. Detecting coverage boundary nodes in wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. Ft. Lauderdale, USA, 2006:868-873
- (上接第 251 页)
- [19] Boudali H, Crouzen P, Stoelinga M. Dynamic fault tree analysis using input/output interactive markov chains[C]// 37th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks, 2007(DSN'07). IEEE, 2007:708-717
- [20] Ćepin M. Reliability Block Diagram[M]// Assessment of Power System Reliability. Springer London, 2011:119-123
- [21] Distefano S, Xing L. A new approach to modeling the system reliability; dynamic reliability block diagrams[C]// Reliability and Maintainability Symposium, 2006 (RAMS'06). Annual. IEEE, 2006:189-195
- [22] Dugan J B, Bavuso S J, Boyd M A. Dynamic fault-tree models for fault-tolerant computer systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1992, 41(3):363-377
- [23] Architecture Analysis and Design Language (AADL)[S]. SAE standards AS5506. Nov 2004
- [24] Vestal S. An overview of the Architecture Analysis & Design Language (AADL) error model annex[C]// AADL Workshop. 2005
- [25] Bozzano M, Cimatti A, Katoen J P, et al. Safety, dependability and performance analysis of extended AADL models[J]. The Computer Journal, 2011, 54(5):754-775
- [26] 邱丽娟. 无线传感器网络可靠性建模研究[D]. 长春:吉林大学, 2011
- [27] Cinque M. Reliability requirements of wireless sensor networks for dynamic structural monitoring [C]// Proceedings of Dependable Systems and Networks. USA, 2008:8-13
- [28] Mak N H, Seah W K G. How long is the lifetime of a wireless sensor network [C]// Proceedings of International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA). Bradford, 2009:769-775
- [29] Le Zheng-yi, Becker E, Dimitrios G. Modeling Reliability for Wireless Sensor Node Coverage in Assistive Testbeds[C]// Proceedings on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments. New York, 2010:46-52
- [30] Lin Cheng-min, Teng Hui-kang, Yang Cheng-chih. A Mesh Network Reliability Analysis Using Reliability Block Diagram[C]// Proceedings of International Conference on Industrial Informatics(INDIN). Taiwan, 2010:975-979
- [31] 吴巍. 无线传感器网络可靠性建模方法[J]. 电子测试, 2012(5):12
- [32] Bein D, Joll V, Kumar B. Reliability Modeling in Wireless Sensor Networks [J]. International Journal of Information Technology, 2005, 11(2):1-9
- [33] Vasar C, Prostean O, Filip I. Markov Models for Wireless Sensor Network Reliability[C]// Proceedings of International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing. Cluj-NaPoca, 2009:323-328
- [34] Vasar C, Prostean O, Filip I. A Reliability Analysis for Wireless Sensor Networks in a Wind Farm[C]// Proceedings of International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies. Bosnia, 2009:1-5
- [35] Purohit N, Varadwaj P, Tokekar S. Reliability Analysis of Wireless Sensor Network [C]// Proceedings of 16th IEEE International Conference on Networks. New Delhi, 2008:1-6
- [36] Shxestha A, Xing Liu-dong, Liu Hong. Modeling and Evaluating the Reliability of Wireless Sensor Networks[C]// Proceedings of Reliability and Maintainability Symposium(RAMS'07). Orlando, 2007:186-191